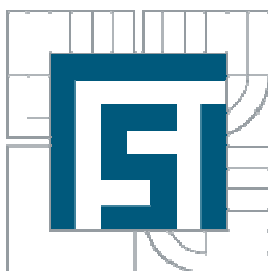




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

APLIKACE METOD RYCHLÉHO PROTOTYPOVÁNÍ VE SLÉVÁRENSTVÍ

APPLICATION OF RAPID PROTOTYPING IN FOUNDRY INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ZBYNĚK KREJČÍ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. VOJTĚCH KOSOUR

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Zbyněk Krejčí

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Aplikace metod rychlého prototypování ve slévárenství

v anglickém jazyce:

Application of rapid prototyping in foundry industry

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Metody rychlého prototypování (RP) se neustále dynamicky vyvíjejí. S jejich rozvojem vzniká stále více možností jejich praktického uplatnění.

cíle bakalářské práce:

Literární rešerše pojednávající o praktických příkladech použití technologií rychlého prototypování ve slévárenském průmyslu.

Seznam odborné literatury:

1. WOHLERS, T. Wohlers Report 2008. 1 st ed. Colorado: Wohlers Associates, 2008. 240 p. ISBN 0-9754429-4-5.
2. BEELEY, PR. and SMART, RF. Investment Casting. 1 st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0-901716-66-9.
3. CHUA, CHK., LEONG, KF. and LIM, CHS. Rapid Prototyping – Principles and Applications. 2nd ed. Singapore: Fulsland Offset Printing, 2004. 411 p. ISBN 981-238-120-1.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vojtěch Kosour

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 19. 11. 2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá praktickou aplikací rychlého prototypování ve slévárenství. Je rozdělena na dvě části. V první části je uveden přehled nejvýznamnějších metod rychlého prototypování, jejich principy, hlavní výhody a nevýhody. Druhá část se zabývá samotnou aplikací těchto metod ve slévárenství a jejím zhodnocením.

Klíčová slova

rychlé prototypování, slévárenství, přesné lití, metoda vytavitelného modelu, metoda vypařitelného modelu

ABSTRACT

These bachelor thesis deals with the practical application of rapid prototyping at foundry industry. In the first part of the thesis is given list of the most important methods of rapid prototyping, those principles, advantages and disadvantages. And the second part is dealing with application of these methods at foundry industry, and its evaluation.

Key words

Rapid Prototyping, foundry industry, investment casting, Lost Wax, Lost Foam

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KREJČÍ, Z. *Aplikace metod rychlého prototypování ve slévárenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 47 s. Vedoucí práce Ing. Vojtěch Kosour.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Aplikace metod rychlého prototypování ve slévárenství* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně, 27.5. 2011

.....
Zbyněk Krejčí

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Vojtěchu Kosourovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za podporu během celého studia.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
Úvod	8
1 Technologie Rapid Prototyping	9
1.1 Co je Rapid Prototyping	9
1.2 Proces výroby modelu.....	10
1.3 Přehled základních metod Rapid Prototyping	12
1.3.1 Stereolitography – SLA	12
1.3.2 Selective Laser Sintering – SLS	13
1.3.3 Laminated Object Manufacturing – LOM.....	15
1.3.4 Fused Deposition Modeling – FDM.....	16
1.3.5 3 – Dimensional Printing – 3DP	17
1.3.6 Multi Jet Modeling – MJM	18
2 Aplikace metod Rapid Prototyping ve slévárenství	20
2.1 Využití RP u technologie přesného lití na vytavitelný model	20
2.1.1 Popis přesného lití na vytavitelný model	20
2.1.1 Nepřímá výroba vytavitelného modelu pomocí metod RP	21
2.1.2 Přímá výroba vytavitelného modelu pomocí metod RP	23
2.1.3 Zhodnocení využití RP u metody vytavitelného modelu	26
2.2 Využití RP u technologie přesného lití na vypořádný model.....	27
2.2.1 Popis přesného lití na vypořádný model.....	27
2.2.2 Zhodnocení využití RP u metody vypořádného modelu.....	29
2.3 Využití RP při tvorbě pískových forem a jader	30
2.3.1 Popis formování do písku	30
2.3.2 Nepřímá výroba pískové formy pomocí RP modelu.....	30
2.3.3 Přímá výroba pískové formy na RP stroji.....	32
2.3.1 Zhodnocení využití RP u výroby pískových forem a jader	34
2.4 Využití technologie RP pro zhotovení trvalých forem	35
2.4.1 Direct Metal Laser Sintering – DMLS.....	35
2.4.2 Laser Engineering Net Shaping - LENS.....	38
2.4.3 Elektron Beam Melting – EBM	39
2.4.4 Zhodnocení využití RP pro zhotovení trvalých forem.....	40
Závěr	41
Seznam použitých zdrojů	42
Seznam použitých zkratk	45
Seznam obrázků.....	46
Seznam tabulek	47

ÚVOD

Technologie rychlého prototypování neboli technologie Rapid Prototyping slouží zejména k rychlé výrobě modelů z plastu, vosku a jiných materiálů. Těchto modelů se využívá hned v několika odvětvích včetně strojírenství; například v lékařství, v umění a architektuře. V této bakalářské práci se zaměřím na samotnou aplikaci Rapid Prototyping ve slévárenství.

Slévárny, které chtějí být úspěšné a prosadit se v konkurenčním boji na trhu, musí neustále vylepšovat své stávající výrobní procesy a začleňovat do nich nové technologie. Jednou z těchto nových technologií je právě Rapid Prototyping. Pomocí technologie Rapid Prototyping jsou například slévárny schopny mít k dispozici velmi rychle (již za několik hodin, maximálně dnů) model přímo z CAD dat, který jim slouží k vytvoření formy (forem) k zhotovení prototypové série odlitků. Navíc pomocí některých metod RP lze vytvořit přímo celou kompletní formu připravenou k odlévání bez použití modelu. To umožní v krátkém čase přijít na případné vady či nedostatky odlévaného výrobku a provést na něm potřebné změny ještě ve vývojové fázi. Znamená to tedy, že Rapid Prototyping napomáhá rychleji uvést výrobek na trh.

1 TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING

1.1 Co je Rapid Prototyping

Rapid Prototyping (RP) v zásadě slouží k co nejrychlejší výrobě prototypů a modelů. Vyvíjí se již od osmdesátých let, kdy vznikla metod stereolitografie. Nyní tvorba modelů a prototypů (prezentačních i funkčních) směřuje především do oblasti výroby forem a nástrojů. Na významu nabývá také oblast koncepčního konstruování, kdy se ověřují definované vlastnosti budoucího výrobku. Ve specifických případech se modely vybudované pomocí RP využívají k simulacím nebo různým typům zkoušek (obtékání, namáhání, atd.) [1].

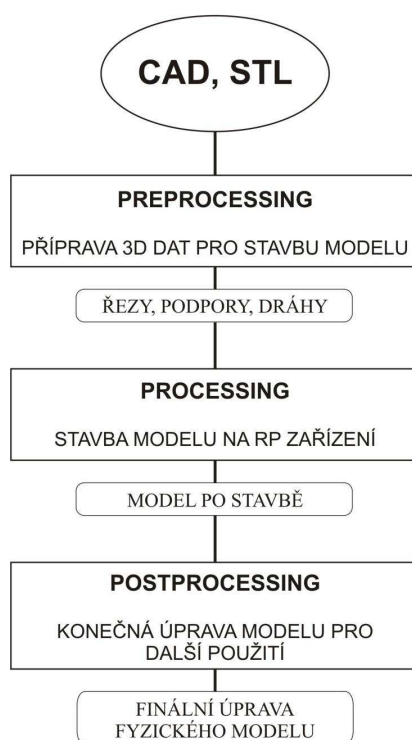
Pro technologii RP je specifické, že fyzický model se vytváří postupně po jednotlivých vrstvách materiálu. Jednotlivé vrstvy jsou přidávány k již dříve vytvořeným. Na rozdíl od klasických metod obrábění, kdy je materiál postupně odebírán z výchozího polotovaru, je materiál při metodách RP postupně přidáván. Metody RP se především odlišují rozdílným fyzikálním principem při tvorbě jednotlivých vrstev [2].



Obrázek 1: Modely vyrobené pomocí RP [3]

1.2 Proces výroby modelu

Proces výroby modelu bývá často dělen do třech základních etap zpracování, označovaných jako preprocessing, processing a postprocessing. Preprocessingem rozumíme přípravu 3D dat pro stavbu dílu, processingem vlastní stavbu dílu metodami RP a postprocessingem další operace (odstranění podpor, povrchová úprava, barvení, vyztužení atd.), které zhodnocují vytvořený model pro použití v dalších oblastech [2].



Obrázek 2: Proces výroby modelu [2]

Do etapy **preprocessing** řadíme všechny kroky, které souvisí s přípravou dat pro systémy Rapid Prototyping. Patří sem například transformace dat ze systémů CAD do formátu STL, při které dochází i k náhradě geometrického tvaru souborem rovinných plošek. V závislosti na tvaru je CAD geometrie nahrazena se zadanou přesností nezbytným počtem rovinných trojúhelníkových plošek. Pro systémy RP je nezbytné, aby tato síť rovinných plošek dokonale uzavírala objem součásti [2].

Tvar součásti je tvořen postupně po tenkých vrstvách (0,05 - 0,2mm). Proto je nezbytné zabezpečit tzv. podpurnou konstrukci vrstev pro geometrické tvary, kde vrstvy nejsou samonosné a mohlo by dojít k jejich zborcení nebo deformaci. Tvorba podpurné konstrukce však není nutná pro všechny metody RP [2].

Po generaci 2D řezů, popisujících libovolnou 3D geometrii, nastává vlastní **processing** a tedy stavba modelu. U většiny metod RP je samotná stavba modelu plně automatizována a proto není potřeba stálého dohledu obsluhy. Stavba modelu probíhá po jednotlivých vrstvách. Stavba těchto vrstev je velmi úzce spojena s konkrétním fyzikálním principem jednotlivých metod RP. Jejich přehled je zobrazen v tabulce (tab. 1). Čas zhotovení jednoho modelu (součástky) se pohybuje v řádu hodin, záleží vždy na velikosti a na zvolené metodě [2].

RP metoda	Podpory	Výchozí materiál	Leaser	Stavba modelu
SLA	ano	tekutý polymer	ano	vytvrzení vrstvy laserem
SLS	ne	prášek - plast, kov	ano	spékání laserem
3 DP	ne	prášek - sádra, kov, keramika	ne	slepení částic, vytvrzením
LOM	ne	fólie - papír, plast	ano	laminátování, ořez laserem
FDM	ano	drát - plast	ne	nanášení vrstvy protlačováním
MJM	ano	termopolymer	ne	nanášení vrstvy protlačováním

Tabulka 1: Rozdíly metod RP [2]

Po vytvoření modelu v systémech RP následuje skupina kroků, které jsou označovány jako **postprocessing**. Prvním úkolem je součást ze zařízení vyjmout. U některých metod je nutno vyčkat i delší čas, než je možno prostor vyráběné součásti zpřístupnit obsluze zařízení. Pokud je prostor součásti obklopen okolním materiálem je nutno materiál odstranit. V závislosti na druhu metody se materiál nejčastěji odsává (práškový materiál) nebo se odstraní oplachem (např. fotopolymer). U některých metod je zhotovený díl křehký a vyžaduje další následné zpracování jako např. vytvrzení dílu UV zářením nebo napuštění dílů další látkou, která zvýší jeho pevnost. Dalším krokem je odstranění podpor, který však není u některých metod potřebný. Odstranění podpor se děje mechanicky nebo probíhá například rozpuštěním podpor v tekuté lázni nebo jejich vytavením. A konečně posledním krokem je povrchová úprava RP modelu. Schodečková struktura součásti a oblasti podpor mohou být mechanicky upraveny speciálními postupy - tmelením, finišováním. Některé materiály mohou být následně standardně obrobena, barvena, lakována nebo galvanicky pokoveny [2].

1.3 Přehled základních metod Rapid Prototyping

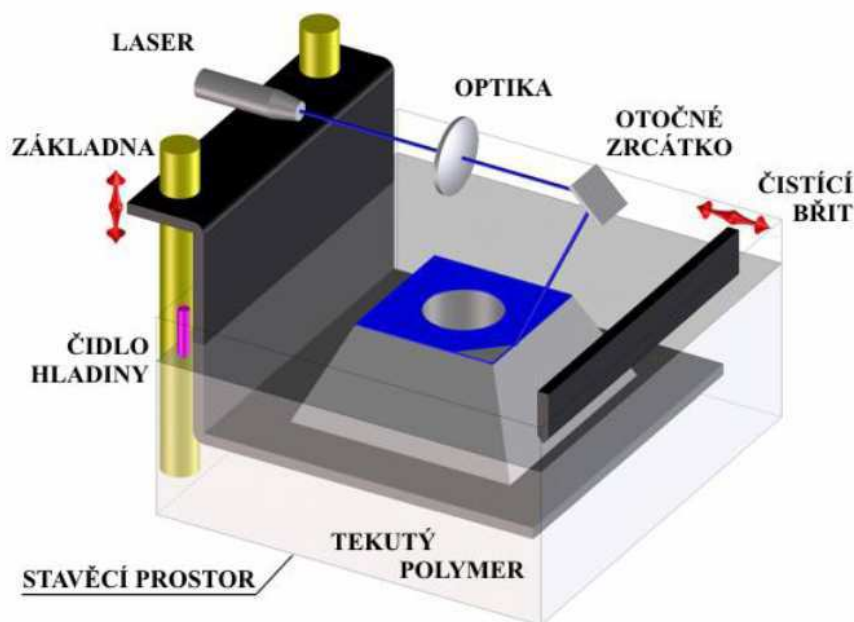
V průběhu let se prosadilo hned několik technologií, které pracují na principu modelování pomocí postupného přidávání nebo vytvrzování vrstev materiálu. Mezi tyto technologie, které jsou souhrnně označovány termínem Rapid Prototyping patří: [1].

- Stereolithography – SLA
- Selective Laser Sintering – SLS
- Laminated Object Manufacturing – LOM
- Fused Deposition Modeling – FDM
- 3-Dimensional Printing – 3DP
- Multi Jet Modeling – MJM

1.3.1 Stereolitography – SLA

Stereolitografie patří mezi nejstarší, ale i nejpresnější metody, které jsou dnes k dispozici. Základním principem této metody je vytvrzování fotopolymeru (plastické hmoty citlivé na světlo) laserovým paprskem. V počítači se vytvořený model pomocí softwaru rozdělí na jednotlivé vrstvy, a tyto data jsou odeslána do stereografického zařízení [4].

Jednou z hlavních částí SL zařízení je vana, která je naplněna citlivým foto-polymerem. Na počátku celého procesu je těsně pod hladinou (o tloušťce jedné vrstvy) ponořena plošina, která postupně po zhotovení jednotlivých vrstev vertikálně klesá. Tloušťky jednotlivých vrstev jsou v rozsahu 0,05 až 0,15 mm. Laserový paprsek, který je usměrňován přes soustavu zrcátek, řízených servo pohony, dopadá na hladinu polymeru, kde se účinkem UV záření materiál polymeru vytvrzuje. Laser nejprve objede geometrii 2D kontury a potom postupně šrafuje krok za krokem vnitřní prostor 2D kontury, zvoleným šrafovacím vzorem. Další senzor hlídá hladinu polymeru, kterou je možno v případě potřeby kompenzovat (důsledek objemového smrštění). Po takto vytvrzené vrstvě plošina klesne a proces se opakuje až do kompletního vytvoření součástky. V místech, kde to tvar součástky vyžaduje, jsou vytvořeny podpory. Ty jsou po dokončení součástky odstraněny a součást (už bez podpor) se vytvrdí v UV peci [2], [5].



Obrázek 3: Schéma technologie Stereolitografie [2]

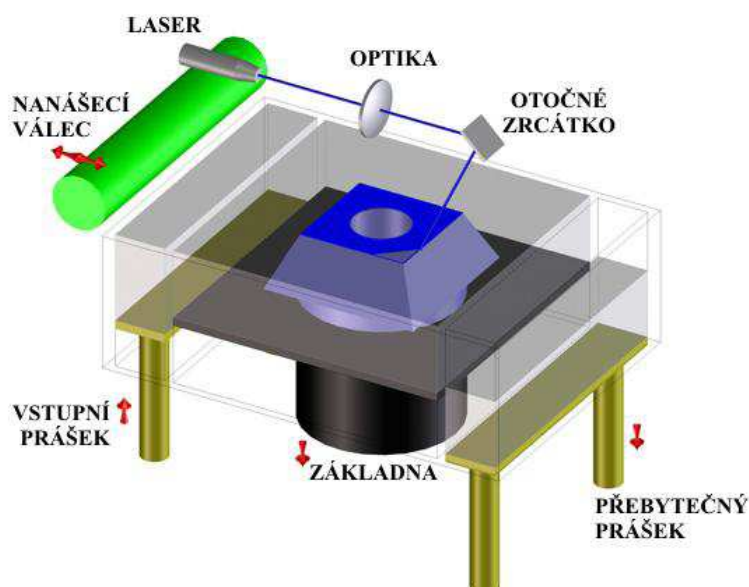
Hlavní výhody a nevýhody metody Stereolitografie:

- + vysoká přesnost
- + kvalita povrchu
- + možnost vytvářet drobné detaily a otvory
- + malé množství odpadu
- pomalý proces tvrzení polymeru v UV peci
- nutnost tvorby podpor a jejich následné odstranění
- nutná speciální šablona pro skladování součástí (borcení vlastní hmotností)
- modely mají malou mechanickou a tepelnou odolnost [1], [5].

1.3.2 Selective Laser Sintering – SLS

Základním principem této metody je nanášení jednotlivých vrstev práškového materiálu, po kterém následuje spékání prášku laserovým paprskem přesně v místech, jejichž polohu získalo zařízení z dat zpracovaných počítačem. V oblasti preprocessingu není nutno generovat podpory. Zhotovené vrstvy jsou při SLS obklopeny nezpracovaným okolním práškovým materiálem, který slouží jako podpora [2], [4].

Proces probíhá v komoře válcovitého tvaru s pohyblivým pístem. Na základnu je v tenké vrstvě rovnoměrně nanášen práškový materiál. Komora je opatřena na obou koncích výměnnými kazetami se zásobou práškového materiálu. Rotující válec nanáší práškový materiál a pohybuje se v prostoru mezi dvěma kazetami. Komora je naplněna inertním plynem a zahřívána na teplotu, která je blízká tavicí teplotě horní vrstvy práškového materiálu. Toto předehřátí má pozitivní účinek na ustálené teplotní podmínky a na pozdější smrštivost zhotovené vrstvy modelu. Laser je usměrněn sadou zrcátek, která je řízena počítačem a postupně skenuje vnitřní oblast 2D řezu na povrchu připravené vrstvy. Dochází zde k natavení jednotlivých částic prášku, které po ochlazení tuhnou v hmotu a ta se nakonec spojí s další již zhotovenou vrstvou. Píst klesne o další vrstvu a válec nanese z kazety příslušnou vrstvu materiálu. Poté se celý proces opakuje až do úplného vytvoření součástky [2], [5].



Obrázek 4: Schéma technologie Selective Laser Sintering [2]

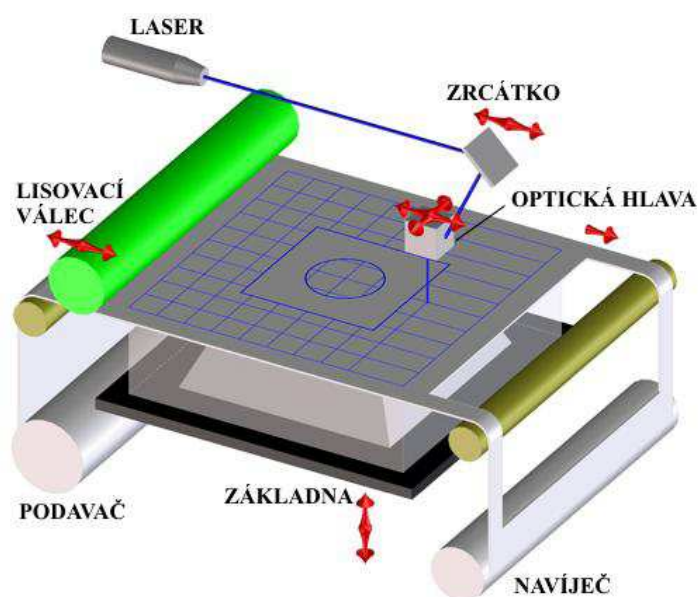
Hlavní výhody a nevýhody metody Selective Laser Sintering:

- + široký výběr používaných materiálů (vosk, nylon, polyamid, polystyrén a další)
- + většinou levné a zdravotně nezávadné materiály
- + modely jsou mnohem pevnější oproti SLA
- + není nutná tvorba podpor

- drsný povrch („schodový efekt“)
- pórovitost součástky
- první vrstva vyžaduje čištění výrobního zařízení
- detaily nejsou tak ostré a dokonalé jako u metody SLA [1], [5].

1.3.3 Laminated Object Manufacturing – LOM

LOM je technologie výroby laminováním, při níž se model sestavuje z plastových folií nebo z mnoha vrstev papíru napuštěného zpevňující hmotou, které jsou oříznuty do správného tvaru laserem. Součástka je vytvářena na svisle se pohybující podložce. Celý proces modelování probíhá tak, že se na nanesenou a vyřezanou vrstvu natáhne papírová folie opatřená vrstvou polyetylénu, která se poté přitlačí soustavou vyhřívaných válců, čímž dojde ke slepení obou vrstev. Paprskem laseru je vyřezán požadovaný obrys vytvářené vrstvy. Prebytečná odřezaná folie je laserem rozdělena na čtverce a později odstraněna. Po vytvoření vrstvy se podložka sníží o tloušťku folie a postup se opakuje [1].



Obrázek 5: Schéma technologie Laminated Object Manufacturing [2]

Hlavní výhody a nevýhody metody Laminated Object Manufacturing:

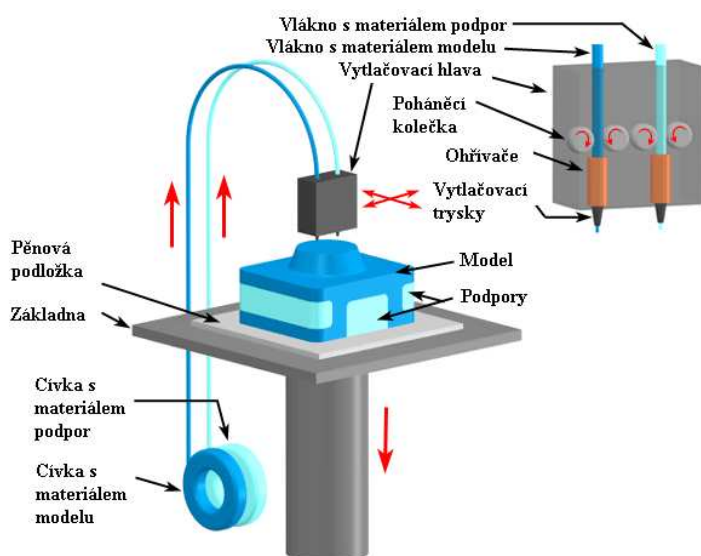
- + velmi rychlá výroba modelů
- + není nutná tvorba podpor
- + vhodné pro výrobu velkých modelů
- + levná údržba výrobního zařízení

- k dosažení hladkého povrchu je nutné součástku brousit, tmelit, stříkat
- při řezání dochází k uvolňování velkého množství plynů (nutné odsávání)
- u složitých součástí, je problém dostat přebytečný materiál ven z modelu
- velkého množství odpadu [1], [5].

1.3.4 Fused Deposition Modeling – FDM

Tato metoda narozdíl od předchozích metod nepoužívá jako nástroj pro stavění součásti laser, ale je založena na principu vrstvení termoplastického nebo voskového materiálu [4], [5].

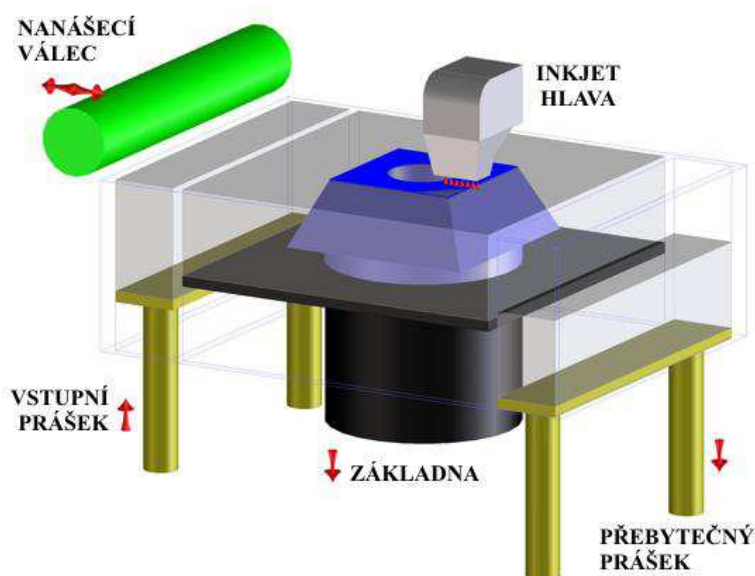
V části preprocessingu je načtený soubor STL dat zpracován do tenkých 2D řezů. Dalším krokem je vytvoření podpor v oblastech modelu, které nejsou při stavbě z vrstev samonosné. Vlastní proces stavby při FDM je velmi jednoduchý. Nanášecí hlava je vybavena dvěma tryskami. Jedna tryska nanáší modelovací materiál a druhá nanáší materiál podpurný. Oba materiály jsou ve formě drátu a jsou nanášeny dle potřeby do obrysu řezu. Drát materiálu je kontinuálně dodáván do nanášecí hlavy, kde se ohřeje lehce nad tavicí teplotu. Po ohřátí je roztavený materiál protlačen přes tenkou trysku nanášecí hlavy, která ho pak na základě instrukcí počítače pozicuje v X,Y směru do vnitřní plochy 2D obrysu. Materiál ihned při nanesení tuhne a připojí se již k vytvořené vrstvě. Tloušťka jedné vrstvy je cca 0,2 až 0,5 mm. Cílem je podobně jako u některých předešlých metod kontinuálně vyplnit vzorem 2D obrys a vytvořit tak souvislou vrstvu. Jakmile je vrstva dokončena, stůl sjede ve směru Z o jednu tloušťku vrstvy dolů a proces se opakuje [2], [4].



Obrázek 6: Schéma technologie Fused Deposition Modeling [6]

1.3.5 3 – Dimensional Printing – 3DP

Tato metoda je svým principem velmi podobná metodě SLS. Hlavní rozdíl spočívá v nahrazení laseru tryskovou hlavou vystřikující pojivo (např. koloidní silici) do vrchní práškové vrstvy řezu základního materiálu (např. z kysličníku hlinitého). Vyráběné součásti jsou umístěny na pracovní desku v komoře stroje a při výrobě jsou obklopeny práškovým materiálem. Částice prášku jsou spojeny v místech, kde bylo aplikováno tekuté pojivo. Po dokončení tvorby jednoho řezu se pracovní píst posune vertikálně směrem dolů o tloušťku vrstvy. Dávkovací zařízení nanese vrstvu práškového stavebního materiálu. Po dokončení zdvihu dávkovacího zařízení je prášek rovnoměrně rozprostřen a stlačen k vrchní části pracovní komory pomocí válce. Tento proces se opakuje tak dlouho, dokud není vyrobena celá součást, popřípadě součásti. Po zhotovení modelu se válec vysune a okolní zbylý materiál se odstraní od modelu. Model je následně napuštěn tvrdidlem pro zvýšení jeho pevnosti před dalším užitím [2], [5].



Obrázek 7: Schéma technologie 3-Dimension Printing [2]

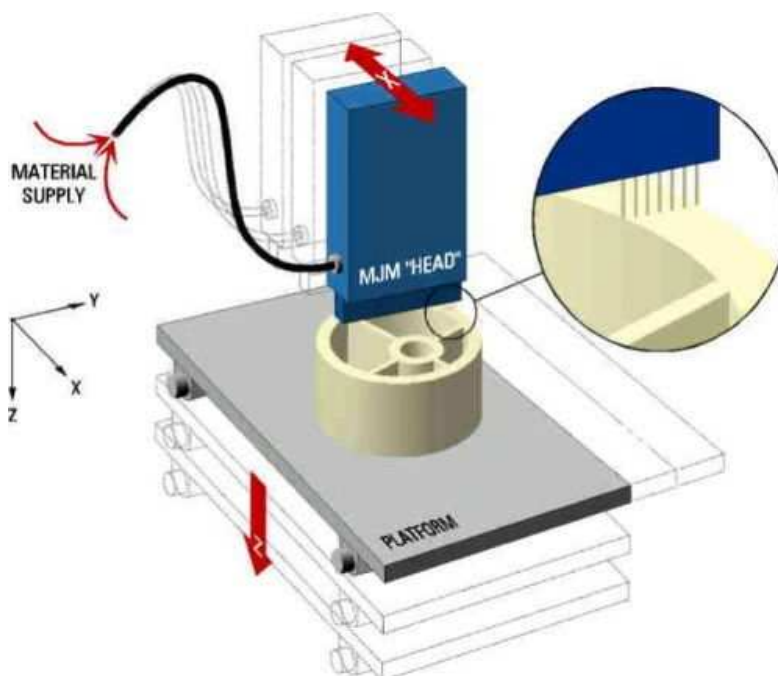
Hlavní výhody a nevýhody metody 3-Dimensional Printing:

- + levná a rychlá výroba
- + možnost vytváření poměrně složitých tvarů
- + metoda je vhodná pro kancelářské použití
- + je možné vytvářet barevné modely

- používaných základních materiálů je málo a nejsou technologického charakteru
- plochy součásti jsou drsné a nejsou odolné proti otěru
- prodloužená dokončovací doba výrobku - musí se separovat
- potřeba zařízení pro odstranění prášku z vnitřních dutin výrobku [5].

1.3.6 Multi Jet Modeling – MJM

Princip metody spočívá v nanášení jednotlivých vrstev termopolyméru postupně na sebe pomocí speciální tiskové pracovní hlavy. Hlava má několik desítek až stovek trysek uspořádaných rovnoběžně vedle sebe. Průtok nanášeného materiálu je pro každou trysku samostatně řízen programem. Model se opět vytváří na zvláštní nosné desce podobně jako u Stereolitografie. Pracovní hlava se pohybuje nad nosnou deskou ve směru osy X. Jestliže je součástka širší jak pracovní hlava, posouvá se ve směru osy Y tak, aby se vytvořila celá součástka. Velký počet trysek zaručuje rychlé a rovnoměrné nanášení materiálu. Nanášený termoplastický materiál ztuhne při styku s už naneseným materiálem téměř okamžitě [1].



Obrázek 8: Schéma technologie Multi Jet Modeling [7]

Hlavní výhody a nevýhody metody Multi Jet Modeling:

- + efektivní a snadné použití
- + vysoký počet trysek umožňuje rychlou a plynulou stavbu modelu
- + levný stavební materiál (thermopolymer)
- + ekonomicky výhodný způsob zhotovení modelů

- malá přesnost
- nelze stavět velké modely (malý stavěcí prostor)
- omezený výběr stavebních materiálů [8].

2 APLIKACE METOD RAPID PROTOTYPING VE SLÉVÁRENSTVÍ

Moderní rychlá výroba modelů (Rapid Prototyping) nachází v poslední době uplatnění i v starších, tradičních odvětvích jako je slévárenství a výroba nástrojů (dutiny a vstřikovací formy). Je to důsledek trendu zkracování časové náročnosti výroby těchto nástrojů a hlavně přemostění mezi prototypovou a sériovou výrobou. Tento trend si vzal za vzor právě metody Rapid Prototyping, metody výroby 3D modelů, které výrazně zkracují časovou náročnost na minimum. Technologie, které využívají Rapid Prototyping, jsou díky tomu obecně známy také pod pojmem Rapid Tooling (RT) neboli rychlá výroba nástrojů (ve slévárenství především forem) [9].

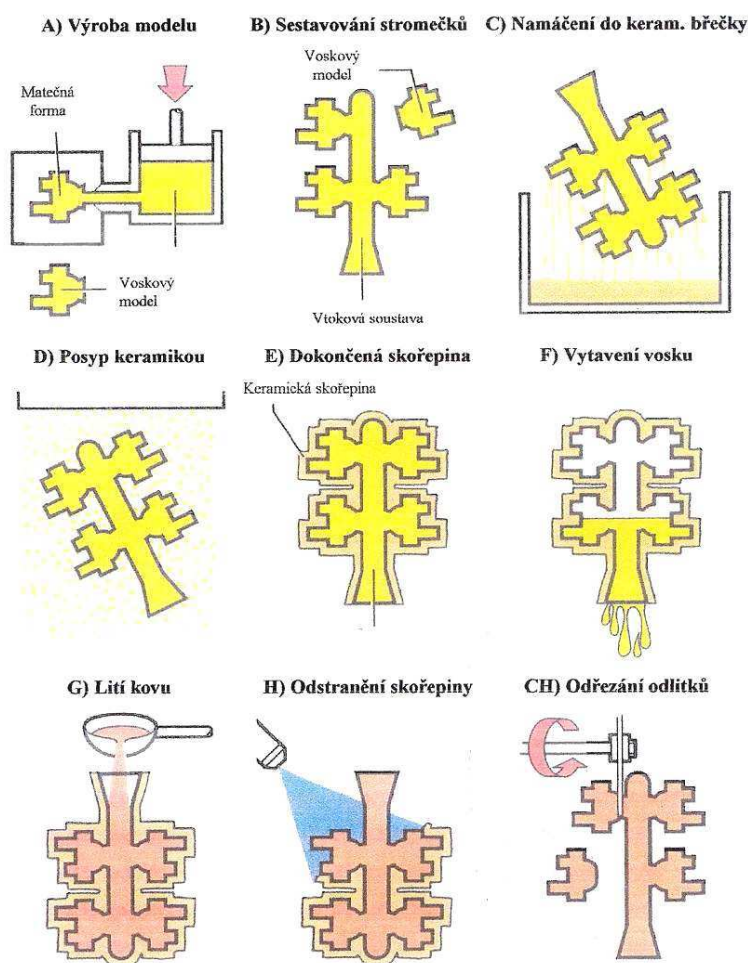
2.1 Využití RP u technologie přesného lití na vytavitelný model

2.1.1 Popis přesného lití na vytavitelný model

Metoda vytavitelného modelu neboli také „lost wax“ nebo „investment casting“ dnes zastává klíčovou pozici na poli moderních technologií lití kovů. Lze ji začlenit mezi technologie near-net-shape (produkty blízké hotovým výrobkům), kdy se přeměna materiálu realizuje na tvary a rozměry blízké hotovým výrobkům [10].

Základním principem této metody je model z materiálů, které mají nízký bod tání. Proto jsou nejčastěji využívány nejrůznější speciální vosky, určené k tomuto použití. Z tohoto vosku je pak za pomoci vstřikolisu a formy vytvořen model budoucího odlitku. Materiály používaných forem jsou různé, od různých nízkotavitelných slitin, přes sádrové a plastové formy až po silikonové, jejichž zvláštních a pro slévárenství výhodných vlastností se s úspěchem využívá zejména v poslední době. K takto vzniklému modelu se připojí vtoková soustava a nálitky. Obvykle se pro více odlitků používá společný licí kůl a společný nálitek, čímž vznikne „licí stromeček“ [11].

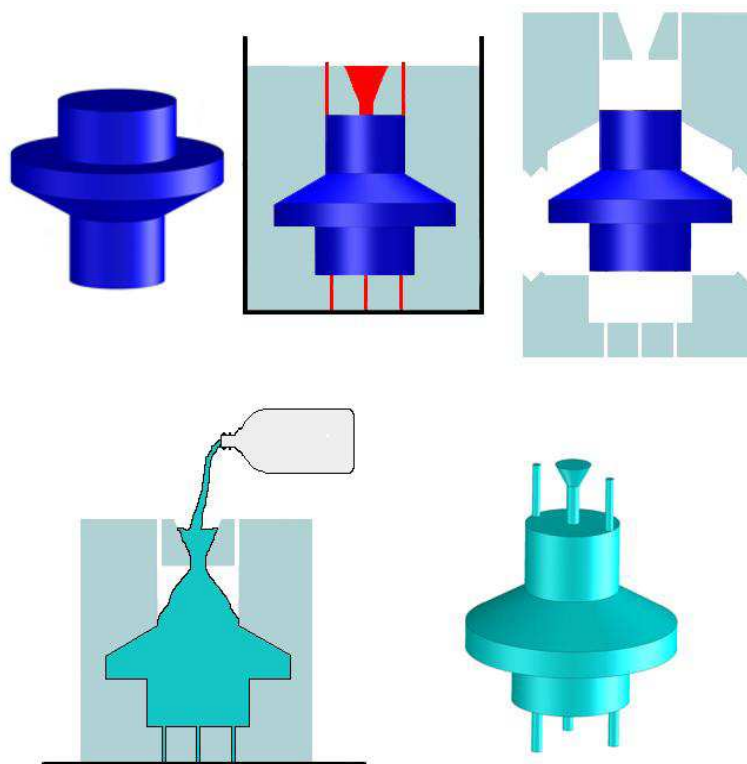
Cela tato sestava se ponoří do obalové hmoty (břečky), která vznikne rozmícháním křemenné moučky ve zvlášť připraveném etylsilikátu. Po vyjmutí se ulpělá kašovitá hmota zasype hrubším pískem a nechá se asi jeden den zatvrdnout. Tím vznikne na modelu tenká skořepina. Podle hmoty odlitku se celý postup 4krát až 8krát opakuje, až vznikne obal o tloušťce asi 3 až 10mm. Model se z obalu odstraní buď vytavením nebo (rozpuštěním ve vařící vodě) čímž vznikne forma. Tato forma je buď samostatná, nebo se u těžších odlitků zpevňuje zasypáním pískem či zalitím cementovou kaší. Zbytky organických látek se odstraní vyžháním při 900 až 1000°. Ihned po vyjmutí z pece se do ještě žhavé formy odleva, takže roztavený kov vyplní i nejtenčí průřezy. Po odlití se skořepina odstraní oklepáním, otryskáním jemným tryskacím materiálem nebo rozpuštěním v roztaveném louhu [11].



Obrázek 9: Schéma lití na vytavitelný model [12]

2.1.1 Nepřímá výroba vytavitelného modelu pomocí metod RP

Pro výrobu vytavitelného modelu je možné použít metodu, která spočívá ve vakuovém odlévání vosku do silikonové formy. Model vytvořený vhodnou metodou RP je zaformován do dvousložkového silikonu (Silicone Rubber Mould). Tento silikon po několika hodinách vytvrdne a vytvoří tak po vyjmutí modelu dutinu. Do této dutiny je možné aplikovat zahřátý vosk v kapalném stavu. Dostáváme tak voskové modely vhodné pro následné odlití metodou vytavitelného modelu. Spolu s prototypovou výrobou modelů obě tyto varianty zkracují celý proces výroby kovových dílů na minimální dobu [9].



Obrázek 10: Schéma vytvoření silikonové formy [2]

Pro zhotovení silikonové formy jsou zejména vhodné modely vytvořené RP metodami SLA a FDM.

Modely vyrobené technologií SL vynikají svojí přesností, mají velmi dobrý povrch a nevyžadují povrchovou úpravu. SLA metoda nejčastěji používá materiály na bázi epoxidů a pryskyřic. Epoxidy se vyznačují malou smrštitivostí a vysokou přesností. Pryskyřice má možnost se smísit dalšími materiály jako jsou keramika nebo kovy. Tím dochází ke značně lepším mechanickým vlastnostem materiálu.

Firma 3D Systems poskytuje pro své zařízení materiálovou řadu **Accura® SL**. Ta obsahuje širokou škálu materiálů lišících se svými vlastnostmi. Například **Accura® 50 Plastic** je odolný a tuhý materiál, který se nesmršťuje. **Accura®CeraMAX™ Composite** je kompozitní plastovo-keramický materiál, který má vynikající odolnost proti otěru, vlhku a vysokým teplotám [13], [14].

FDM modely z ABS materiálu jsou pevné a v čase rozměrově stálé, takže mohou být bezproblémově použity pro opakované použití. Přehled nejpoužívanějších materiálů metody FDM a jejich vlastnosti jsou uvedeny v tabulce (tab. 2).

Materiál	Charakteristika	Tepelná odolnost	Pevnost v tahu	Pevnost v ohybu
ABS	Základní, nejpoužívanější	90°C	22 MPa	41 MPa
ABSi	Vysoká pevnost, rozměrová stabilita; je průhledný	87°C	37 MPa	62 MPa
ABS-M30	Vyšší pevnost a kvalita povrchu než u ABS	96°C	36 MPa	61 MPa
ABS plus	Je pevnější o 40 % než ABS	160°C	36 MPa	52 MPa
PC	Vysoká rozměrová stabilita	138°C	68 MPa	104 MPa
PC/ABS	Dobré mechanické vlastnosti, tepelná odolnost	110°C	41 MPa	68 MPa

Tabulka 2: Přehled nejpoužívanějších materiálů FDM metody [15]

2.1.2 Přímá výroba vytavitelného modelu pomocí metod RP

Materiálů, kterými je možné nahradit voskové modely, se v oblasti RP nabízí více. Jednou z nejznámějších a používaných postupů je metoda americké firmy 3D Systems - **QuickCast**. Je to metoda, kterou se v systémech SLA vytváří vytvrzováním model, který se vyznačuje uvnitř polodutou strukturou. Tento model je pak úspěšně použit místo voskového modelu [2].

Z počátku pevné modely vyrobené metodou SLA z akrylátové pryskyřice nebylo snadné používat. Nedali se z keramické skořepiny vytavit s použitím standardního autoklávu a pokusy vypálit je plamenným žíháním skončily katastrofickým prasknutím skořepiny v důsledku vysoké tepelné expanze pryskyřice. Během několika let výrobci vynalezli řešení tohoto problému zavedením postupu QuickCast. Tento postup speciálně vyvinutý pro přesné lití zavádí dvě základní inovace – použití dutého (voštinového) modelu s jádrem a epoxidové pryskyřice místo pryskyřice akrylové. Během vypalování modely rychle ztrácejí svoji tuhost, vytavují se a tím zabraňují poškození skořepiny [16].

Výhodou QuickCast oproti klasickému postupu je možnost vyrábět velmi složité, tvarově komplikované součástky ve velmi krátké době. QuickCast je vhodný pro výrobu jednoduchých i složitých kovových dílů rozličných tvarů. Přesnost modelu, který je vyroben na SLA zařízení se pohybuje v setinách milimetru. Nevýhodou je poměrně vysoká cena modelu určená cenou pryskyřice a cenou vlastního softwaru [16].

Další možností jsou stroje pro tisk vosku. MJM stroj Thermojet má 350 „tiskových“ trysek a může rychle vyrábět součásti až do rozměrů 250x190x200 mm (X, Y, Z). Jedním ze základních problémů u běžného postupu MJM je odstraňování výztužného materiálu. Pro vyztužení spodních ploch součástí se „tisknou“ štetinovitě trsy materiálu (obr. 11), které se špatně odstraňují (lámou se a ulpívají na povrchu součástí) a navíc zanechávají drsný kráterovitý povrch. Bez ohledu na ty to nevýhody je postup MJM jedním z mála postupů RP, na který tradiční slévárny přesného lití přecházejí z důvodu nízkých investičních nákladů a poměrně vysoké rychlosti výroby [16].



Obrázek 11: Výztužný materiál na výrobcích vyráběných na MJM strojích [16]

Jedno z možných řešení problému vyztužení „tištěných“ voskových modelů vynalezla americká společnost Solidscape (dříve Sanders Inc.). Firma Solidscape „tiskne“ dva materiály, vodorozpustný výztužný vosk. Vyrobená součást se umístí do čistícího zařízení, kde výztužný vosk vyteče z hotového modelu [16].

Tiskárny od firmy Solidscape používají dvě piezoelektrické trysky, jednu na stavební materiál, druhou na podpurný materiál. Vosky jsou netoxické. Dodávají se v granulích a lze je doplňovat prakticky kdykoliv i během práce. Rychlost tryskání odpovídá šesti až dvanácti tisícům mikrokapiček za sekundu, na čtvereční milimetr padne asi 38 tisíc kapiček. Vrstva může mít tloušťku od 12,7 do 76 μm při 2,5setinové přesnosti. Každá vrstva se frézuje frézou

s vodorovnou osou rotace, přičemž právě nastavitelný úběr definuje tloušťku vrstvy a tím jakost povrchu [17].



Obrázek 12: Tiskárna Solidscape T76 Benchtop [17]

Materiál je rozměrově stabilní, velmi pevný a na rozdíl od běžných vytavitelných vosků odolává teplotám až do 100°, teprve pak začíná měknout a při vyšších teplotách se vytavuje. Technologie dosahuje v osách X a Y (vodorovně) „rozlišení“ 5000x5000 dpi a v ose Z dokonce 8000 dpi. Z tohoto důvodu již odpadá potřeba ruční úpravy povrchu. Tisk i malých modelů je ovšem otázkou mnoha hodin či desítek hodin, na druhou stranu však probíhá bez potřeby zásahů či dohledu obsluhy. Za předpokladu použití stejné tloušťky vrstvy můžeme zhotovovat i několik modelů najednou. Díky značné přesnosti tisku může najít uplatnění při vytváření modelů, jejichž výroba tradičními technologiemi je často několikanásobně dražší nebo zcela nemožná. Příkladem budiž šperk na obrázku (obr. 13) [16], [17].



Obrázek 13: Šperk vyrobený na tiskárně Solidscape [17]

Další firma nabízející zařízení, jenž dokážou tisknout voskové, ale i ABS modely (které lze využít k přesnému lití na vytavitelný model) přímo z SLS dat, je firma Stratasys Inc, jejíž zařízení pracují na principu technologie FDM.

Velkou nevýhodou použití voskových modelů je samotná povaha materiálu, který je velmi křehký a tím i snadno rozbitný. Nastává tedy problém s manipulací. Tento problém do jisté míry vyřešil ABS materiál tisknutý na 3D tiskárnách firmy Stratasys Inc. ABS materiál zmírnil manipulační problémy vzhledem ke své vyšší pevnosti. Díky ní jsme schopni produkovat mnohem tenčí pevné stěny ve srovnání se systémy na bázi pryskyřice [18].

	ICW06 vosk	ABS
Pevnost v tahu (MPa)	3,5	34,45
Modul pružnosti (MPa)	275	2495
Síla nárazu (J/m)	17	107

Tabulka 3: Typické mechanické vlastnosti FDM materiálů [18]

Povrch ABS modelu není tak dobrý jak u voskového modelu, ale vlastnosti ABS umožňují jeho konečné povrchové úpravy [18].

ABS modely se dají vytavit s použitím standardního autoklávu. Pro snazší vytavení mohou mít modely voštinové výplně [18].

2.1.3 Zhodnocení využití RP u metody vytavitelného modelu

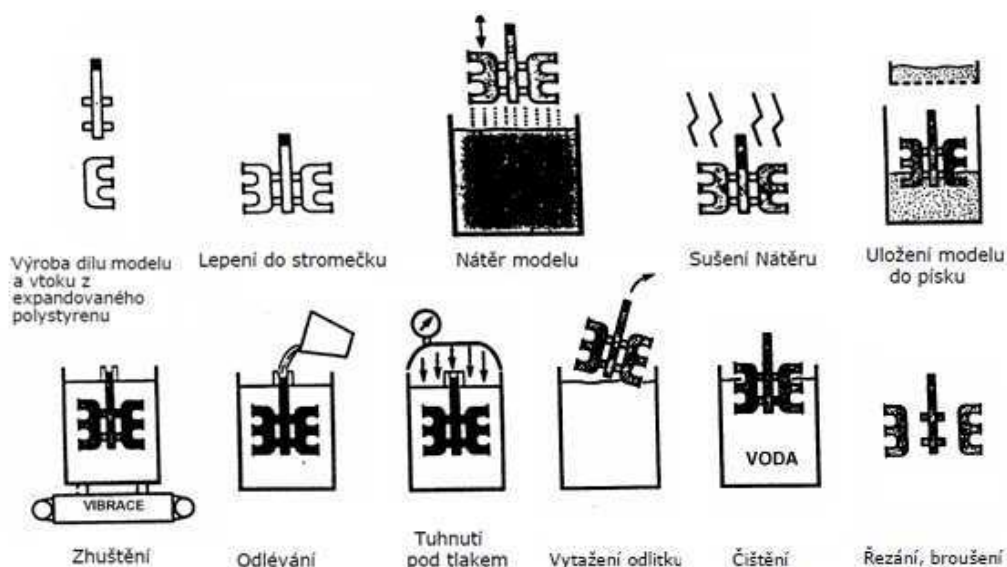
RP metody umožňují rychle vyrobit tvarově velmi komplikované voskové modely, které by klasickými postupy bylo technicky a časově velmi náročné a drahé. Pomáhají zkracovat celý proces výroby vytavitelného modelu a umožňují tak rychlou a pružnou reakci ve stádiu vývoje. RP metody je vhodné použít také při požadavku několika kusů či malých sérií.

2.2 Využití RP u technologie přesného lití na vypařitelný model

2.2.1 Popis přesného lití na vypařitelný model

Metoda odlévání na vypařitelný model **Lost Foam** patří mezi moderní slévárenské technologie. Praktické uplatnění si našla zvláště při sériové výrobě tvarově složitých tenkostěnných odlitků z litiny a hliníkových slitin [19].

Při této metodě se odlévá do formy, v níž je v místě budoucího odlitku umístěn vypařitelný model z pěnového polystyrénu. Během lití se polystyrén před postupujícím kovem vypařuje a tak vytváří dutinu budoucího odlitku. Z polystyrénu je vytvořen nejen vlastní model, ale i části vtokové soustavy a nálitky. Tento komplet je opatřen žáruvzdornou ochranou vrstvou máčením v aluminium silikátu. Model s nátěrem se musí dále sušit. Takto připravené modely se zaformují do ocelového na horní straně otevřeného kontejneru. Polystyrénový model s nátěrem se volně položí na pískové lože, na dně kontejneru. Na vtokovou soustavu se přilepí vtokový kůl, tvořený trubkou z tepelně izolačního vláknitého materiálu. Model se postupně, v několika vrstvách, zasypává suchým pískem se zrnitostí 0,5 mm. Každá vrstva se zhutňuje řízenou vibrací. U metody Lost Foam se nepoužívají žádná jádra. Model má tvar konečného odlitku a zásypový materiál musí vyplnit i tvarově komplikované a špatně přístupné dutiny. Při odlévání dochází k vypařování polystyrenu před čelem proudu. Aby vypařování probíhalo plynule, používá se spodní vtok. Kov přitéká do nejnižšího místa formy a jeho hladina postupně stoupá. Zpěnění polystyrenu prostupuje vrstvou nátěru a zásypovým materiálem a při styku se vzduchem nad formou shoří. Po odlití kov ve formě tuhne a odlitek chladne na teplotu, kdy je možné jej ze zásypu uvolnit. To se provádí vysypáním celého obsahu kontejneru na vibrační žlab. Zde písek propadne pod vibrační pás a po ochlazení se vrací zpět do výrobního cyklu [19].



Obrázek 14: Princip metody vypařitelného modelu [20]

Velkou výhodou této metody je to, že umožňuje lití tvarově složitých dílů bez nutnosti vyjímání modelu. Odpadá tedy potřeba úkosů, úprav dělicí roviny, vnějších jader a náročného formování. Použití této metody je výhodné jak v kusové výrobě tvarově složitých odlitků (např. tvarových nástrojů) tak i v sériové výrobě obtížně formovatelných odlitků (např. u těles a dílů elektromotorů) [20].

Obzvlášť vhodnou metodou RP pro výrobu polystyrénového spalitelného modelu je **Selective Laser sintering**, konkrétně **SLS - Plastic**. Německá firma EOS, jejichž zařízení pracují na principu SLS, používá k výrobě spalitelného modelu speciální polystyren **PrimeCast® 101**, pomocí kterého se dají zhotovit tvarově velmi složité modely odlitků. K výrobě modelu je dále vybrán jeden z přístrojů řady EOSINT P. Tyto přístroje se od sebe liší především rychlostí stavby a maximální velikostí zhotovitelných modelů [21].

Například: EOSINT P 390 zhotoví součástky do velikosti 340 mm x 340 mm x 620 mm, jeho stavební rychlost je až do 35 mm výška/h. EOSINT P 700 zhotoví součástky do velikosti 700 mm x 380 mm x 580 mm, jeho stavební rychlost je 10 – 25 mm výška/h [22],[23].



Obrázek 15: Kryt čerpadla vytvořený z materiálu PrimeCast® 101 [24]

Další materiál, využíván na zařízeních pracujících na principu SLS, k výrobě spalitelného modelu je **CastForm™ PS**. Tento materiál od americké společnosti 3D Systems se vyznačuje nízkou hustotou a velmi malým množstvím zbytkového popela (< 0,02%), přičemž proces vyhoření je poměrně krátký. Je ideální pro tvorbu modelů pro přesné lití z nízkotavitelných kovů, jako je hliník, hořčík a zinek [25].



Obrázek 16: Model vytvořený z materiálu CastForm™ PS [18]

	CastForm™ PS (3 DS)	PrimeCast® 101 (EOS)
Hustota kg/m ³	0,46	0,61
Pevnost v tahu (MPa)	2,8	1,2 až 5,5
Modul pružnosti (MPa)	1604	1600

Tabulka 4: Typické mechanické vlastnosti SLS materiálů [18]

2.2.2 Zhodnocení využití RP u metody vypařitelného modelu

U klasického postupu výroby modelu z polystyrenu je potřeba zařízení pro výrobu zpěněného polystyrenu a kovová forma, která je velmi drahá. Z těchto důvodů se využívá pro sériovou a hromadnou výrobu.

Díky RP metodě SLS lze využít výhody technologie vypařitelného modelu pro malosériovou i kusovou výrobu za relativně příznivých výrobních nákladů. Jejich použití je dále výhodné a rychlé k výrobě tvarově složitých a obtížně formovatelných odlitků.

2.3 Využití RP při tvorbě pískových forem a jader

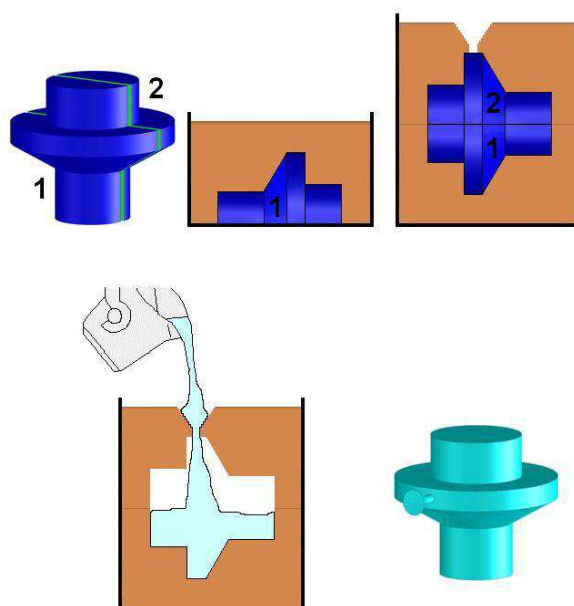
2.3.1 Popis formování do písku

Formování do dvou rámu - používá se v malosériové výrobě. Na formovací desku se položí spodní polovina modelu a formovací rám. Do rámu se přeseje sítem modelový písek a upěchuje se k modelu. Zbývající prostor v rámu se vyplní pískem a rovněž se upěchuje. Dle potřeby se forma odzdušní napícháním průdchů. Tím je zaformován spodek formy. Potom se rám překlápí o 180°, dělicí rovina se očistí, nasadí se druhá polovina modelu. Na dolní rám se nasadí horní a oba se pomocí zaváděcích kolíků proti sobě zajistí. Další postup je stejný jako u formování spodku formy. Potom se z formy vytáhnou kolíky pro vtok a výfuk. Vrchní díl formy se nadzvedne a překlápí o 180°. Pro zvýšení pevnosti písku se navlhčí okraje modelu, poklepe se na model a vyjme. Forma se složí a zabezpečí proti vztlaku kovu vhodným zatížením. Tím je forma připravena k lití [26].

2.3.2 Nepřímá výroba pískové formy pomocí RP modelu

V tomto případě jsou metody RP využívány k tvorbě modelů a jader, která jsou pak klasicky zaformována do formovací směsi místo běžných modelů ze dřeva, plastu ...

RP model je rozdělen v dělicí rovině na dvě poloviny, kdy každá polovina modelu slouží k vytvoření jedné poloviny pískové formy. Je také možnost vytisknout obě poloviny zvlášť [2].

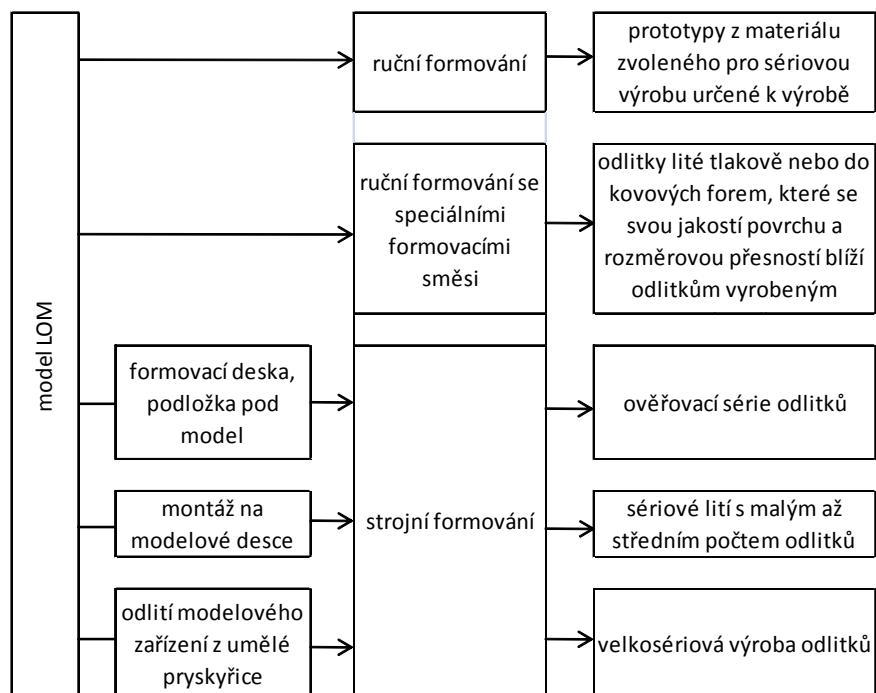


Obrázek 17: Schéma vytváření pískové formy [2]

Rovněž je také možné aplikovat RP metody pro zhotovení jader, kde je možnost aplikovat RP metody pro konstrukci jaderníků. V případě využití technologie např. v letectví, kdy některé formy, mohou mít až 20 vnitřních jader. Vyrobit takovou formu klasickým způsobem je velmi časově náročné. Pomocí metod RP je při stavbě jader a dalších tvarových dílů možné čas snížit až o 50%. Nehledě k tomu, že při opravě nebo modifikaci máme k dispozici CAD data, které mohou být snadno opravena, a proces se může opakovat. Opět je k dispozici řada materiálů, z kterých je možno vyrobit jednotlivé tvarové díly RP modelů. Např. FDM používá univerzální ABS materiál, LOM papír, SLA epoxidové polymery [2].

Vhodnost **FDM** a **SLA** modelů k zaformování je dáno jejich vlastnostmi, které byly již popsány v kapitole 2.1.2.

Použitelnost postupu **LOM**, stejně jako ostatních technologií RP, ovlivňuje zvláště při použití ve slévárenství robustnost a odolnost modelů proti opotřebení. U slévárenských modelů vyrobených postupem LOM jsou důležité následující vlastnosti: odolnost vůči vlhkosti; odolnost vůči opotřebení; pevnost a stabilita. Aby bylo možné těchto vlastností dosáhnout, je na jedné straně nezbytná správná volba materiálu pro postup LOM a na druhé straně účelná úprava povrchu modelu. Výběr materiálů pro postup LOM, které jsou na trhu, je rozsáhlý. Vedle klasických druhů papíru jsou k dispozici i vysoce odolné materiály – kompozitní materiály, plastické materiály a keramické fólie. Pro zdokonalení povrchu modelů lze použít speciální otěruvzdorné organické laky či nanést tenkou vrstvu různých materiálů, jako je titannitrid a uhlík [27].



Obrázek 18: Použití LOM k odlévání do pískové formy v závislosti na množství odlitků [27]

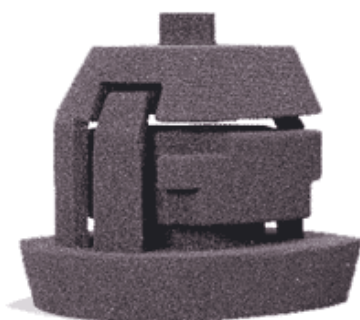
2.3.3 Přímá výroba pískové formy na RP stroji

Dalším novým přístupem je použití metod RP k přímému zhotovení pískových jader a forem. Tyto metody znamenají opravdu revoluční převrat ve výrobě forem pro pískové lití. Jedním z představitelů této technologie je německá firma EOS. Jejich největší RP systém EOSINT S 750, pracující na základě **SLS**, umožňuje tvorbu kompletních pískových forem a jader až do velikosti 720x380x380 mm. EOSINT používá několik licích písků, které mají podobné vlastnosti jako řada písků standardně používaných. Tyto písky jsou vhodné pro pozdější zpracování např. hliníku a oceli. Při tvorbě formy nejsou vyžadovány žádné modely a jádra, neboť i extrémně složité formy jsou založeny na výrobě po vrstvách. To znamená, že konstrukce formy se velmi zjednoduší především v jejím konečném procesu montáže [2].



Obrázek 19: Příklad stroje EOSINT S 750 [21]

Jak již bylo řečeno, EOSINT pracuje na bázi spékání písku, a to postupně jednu vrstvu po druhé. Tímto způsobem je samozřejmě možné vytvářet podřezané a vnitřně zakřivené tvary, které bychom pomocí konvenčních metod nikdy nevytvořili [2].



Obrázek 20: Forma vyrobená na zařízení EOSIT S 750 [28]

Zařízení pro přímé zhotovení pískových forem rovněž nabízí německá firma ProMetal RCT, která distribuuje zařízení S-15 pracující na principu 3DP. Toto zařízení umožňuje zhotovit pískové formy až do velikosti 1500x750x700 mm [2].



Obrázek 21: Zařízení ProMetal RCT, forma a výsledný odlitek [29]

Další firmou, která vyrábí zařízení pro výrobu pískových forem a jader bez použití modelu je americká firma Z Corporation. Jejich zařízení pracuje rovněž na principu 3DP a s jejím využitím lze dosáhnout na 3D tiskárnách přímého tisku forem nebo jader ze speciálního písku ZCast 501 do velikosti 254x381x203 mm [30].



Obrázek 22: Forma z písku ZCast 501 a výsledný odlitek [31]

2.3.1 Zhodnocení využití RP u výroby pískových forem a jader

RP metody se používají k výrobě modelu a jader, který se klasicky zaformují do formovací směsi. Dojde tak ke zrychlení přípravy výroby. Tento způsob je vhodný ve fázi vývoje nebo u malých sérií, kdy se nevyplatí vyrábět klasický model.

Další možností je použít metody RP k přímému zhotovení pískových forem a jader z SLS dat. Není potřeba modelu a tedy jeho vyjímání. Proto můžeme vytvořit pískovou formu se zápornými úkosi a celkově složitými tvary, které by klasicky nešly udělat.

2.4 Využití technologie RP pro zhotovení trvalých forem

Pomocí některých metod RP podobných těm základním uvedených v kap. 1.3. lze vyrobit přímo kovové komponenty bez předešlého odlévání, kování a obrábění. Tyto metody jsou označovány jako Rapid Tooling (RT), konkrétně Hard Tooling. Jelikož se pomocí těchto metod nevyplatí z ekonomického hlediska vyrábět větší množství kovových výrobků, využije se těchto metod k vytváření trvalých kovových forem, které jsou pak použity k opětovnému odlévání.

Tyto metody lze rozdělit do tří základních skupin:

- první skupinu tvoří metody, kde je geometrie nástroje nebo kovové součásti vytvořena ve stavěcí komoře (vyplněné práškovým materiálem) za působení účinku laseru, tedy podobná koncepcí jako metoda SLS
- druhou skupinou tvoří metody, kde je roztavený materiál postupně nanášen do aplikovaného místa
- třetí skupinou jsou metody pracující na jiném principu [2]

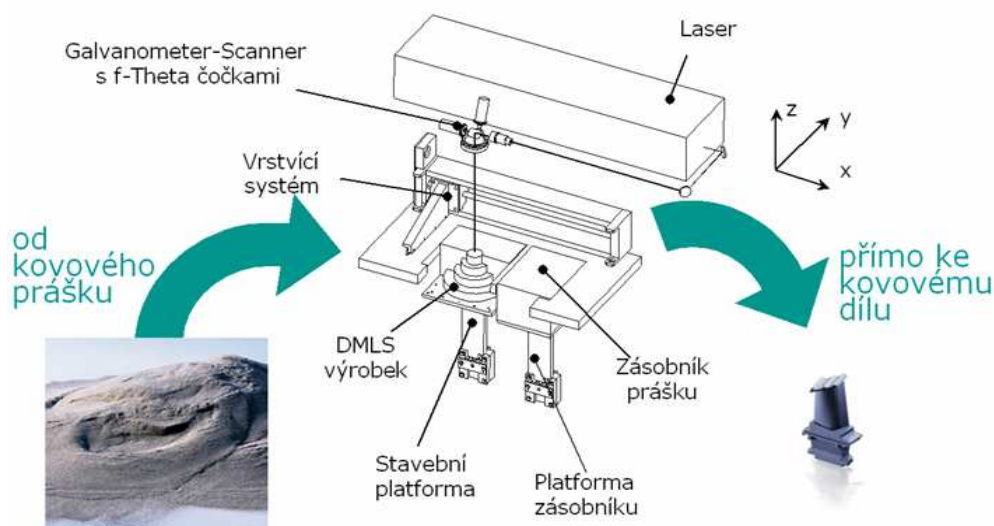
Nyní si uvedeme některé z nich:

2.4.1 Direct Metal Laser Sintering – DMLS

DMLS německé firmy EOS GmbH nabízí zařízení EOSINT M250 Xtended (CO₂ laser) a EOSINT M270 (fiber laser), které mají dobrý detail a dobrý stavěcí výkon [2].

DMLS je technologie založená na postupném tavení velmi jemných vrstev kovového prášku pomocí laserového paprsku. 3D CAD model výrobku je nejprve „rozřezán“ na jednotlivé vrstvy, díl je pak stavěn vrstvu po vrstvě. Energie laserového paprsku lokálně taví kovový prášek pouze v konturách řezu, který je definován průnikem dané roviny tělesem výrobku. V průběhu stavby dílu je nezbytná fixace správné polohy dílu pomocí podpůrné struktury, která je ukotvena k základní ocelové platformě. Podpůrné prvky jsou stavěny vrstvu po vrstvě zároveň s výrobkem. Minimální tloušťka vrstvy je 20 mikronů. Laser důkladně taví kov ve formě prášku a tím je zajištěno dokonalé spojení jednotlivých vrstev. Laserový paprsek je precizně řízen v x a y souřadnicích, osa z je řízena posunem platformy o 20 mikronů při změně vrstvy, což umožňuje dodržení tvarových tolerancí v rozmezí ± 0.1 mm [32].

Pracovní prostor zařízení EOSINT M270 je 250x250x215 mm tento rozsah umožňuje výrobu dílů malé až střední velikosti v rozmezí několika hodin či dnů oproti dnům až týdnům při využití tradičních technologií. Po spuštění procesu zařízení pracuje v plně automatickém režimu 24 hodin denně. Po zakončení výrobního procesu je platforma s výrobky vyjmuta z pracovního prostoru zařízení a díly jsou odděleny od platformy [32].



Obrázek 23: Schéma technologie Direct Metal Laser Sintering [32]

Dokončovací operace jsou nezbytnou součástí výrobního procesu. Nejprve je nutno odstranit podpurné struktury z povrchu výrobku, povrch lze dále tryskat, brousit, leštit či obrábět stejným způsobem, jako klasický kovový materiál. Principiální výhodou přímé výroby kovových dílů pomocí DMLS procesu je fakt, že odpadá potřeba výrobního nářadí (forem, lisovacích nástrojů...). Nespotřebovaný prášek je z 98% znova využíván pro výrobu, tzn. že proces je ekonomický a zároveň ekologický. DMLS umožňuje vytvářet vnější i vnitřní tvary součástí (jakkoli složité) zároveň, což v důsledku přináší možnost přímé výroby tvarově komplexních dílů, které by dříve bylo nezbytné z technologických důvodů vyrobit z několika součástí - je zde určitý potenciál úspory výrobních nákladů, zkrácení doby kompletace a zvýšení spolehlivosti. DMLS proces umožňuje aplikovat drobné konstrukční variace pro každý jednotlivý díl, tzn. výrobu produktů optimalizovaných dle individuálních požadavků zákazníka [32].

MATERIALY

Výběr materiálů je široký - od lehkých slitin přes oceli až po super-slitiny a kompozity. Firma EOS vyvinula specifické slitiny pro DMLS proces a zároveň optimalizovala standardní průmyslové materiály jako např. nerezové oceli [32].

Direct Metal 20 (DM 20)

Velmi jemný multi-komponentní prášek na bázi bronzu. Výsledné díly nabízí dobré mechanické vlastnosti s výborným rozlišením detailu a kvalitou povrchu. Povrch výrobku lze snadno dokončit tryskáním nebo může být velmi snadno vyleštěn. Tento materiál je ideální pro výrobu funkčních kovových prototypů, zároveň je vhodný pro výrobu prototypových či malosériových vstřikovacích forem [32].

Direct Steel 20 (DS 20)

Velmi jemný multi-komponentní prášek na bázi oceli, nabízí vysokou pevnost, tvrdost, otěruvzdornost a hustotu povrchu. Rychlost výroby v porovnání s DM 20 je nižší, vzhledem k nutnosti důkladného protavení povrchu dílu. Tento materiál nachází využití zejména při výrobě vstřikovacích forem a funkčních prototypů [32].

Nerezová ocel (EOS SS 17-4)

Nerezová ocel ve formě jemného prášku. Složení odpovídá US klasifikaci 17-4, evropské normě 1.4542 a splňuje požadavky AMS 5643 pro Mn,Mo,Ni,Si,C,Cr a Cu. Tento typ oceli je charakteristický vysokou korozní odolností a mechanickými parametry. Výrobky mohou být dále opracovány tryskáním, obráběním, leštěním, mohou být svařovány či pokoveny. Tento materiál je ideální pro výrobu funkčních kovových prototypů, individualizovaných dílů či náhradních dílů [32].

Martenzitická ocel 1.2709 (EOS MS 1)

Martenzitická ocel ve formě jemného prášku. Složení odpovídá US klasifikaci 18 Maraging 300, evropské 1.2709 a německé X3NiCoMoTi 18-9-5. Tento typ oceli je charakteristický velmi vysokou pevností a tvrdostí povrchu. Je snadno obrobitelná a následně vytvrditelná až na 54 HRC. Materiál se běžně používá pro výrobu forem a nástrojů či vysoce zatěžovaných průmyslových součástí [32].

Kobalt Chrom (EOS CC MP1)

EOS Cobalt Chrome MP1 je směs jemného prášku, ze kterého lze na zařízení EOSINT M270 získat díly z Cobalt Chrome Molybden superslitiny. Tato superslitina je charakteristická excelentními mechanickými parametry (pevnost, tvrdost ...), korozní a teplotní odolností. Slitina se běžně používá pro medicínské aplikace (implantáty, zubní náhrady) a také pro výrobu vysoce tepelně zatěžovaných součástí (letecké motory) [32].

Titan (EOS Ti 64 / Ti64ELI)

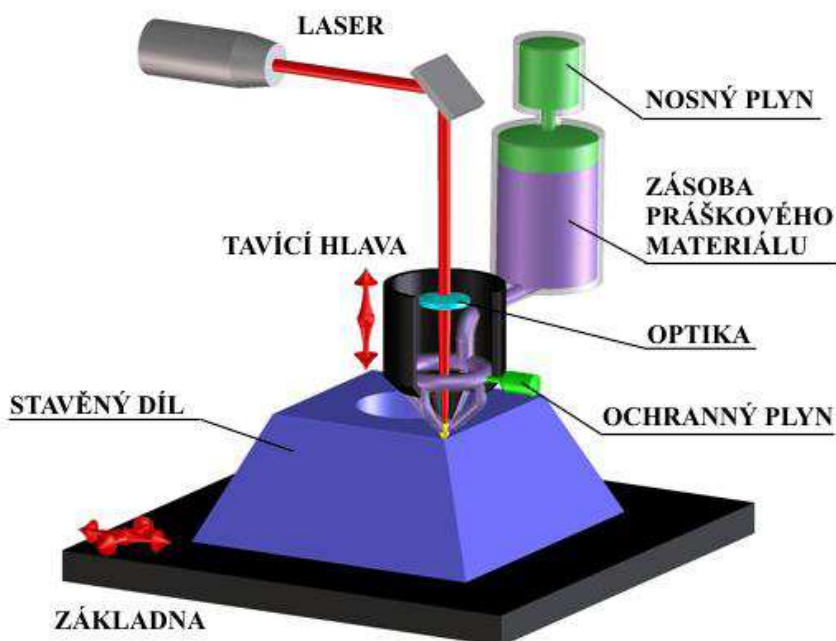
Ti6AlV4 slitina ve formě jemného prášku. Pro tuto lehkou slitinu jsou charakteristické excelentní mechanické vlastnosti a korozní odolnost v kombinaci s nízkou specifickou hmotností a biokompatibilitou. Materiál se

používá zejména v letectví, při výrobě závodních automobilů a v medicínských aplikacích (implantáty) [32].

2.4.2 Laser Engineering Net Shaping - LENS

Sandia National Laboratories vyvinul novou technologii pro výrobu tří-rozměrných kovových komponentů přímo z CAD modelů. Tento proces se nazývá Laser Engineering Net Shaping (LENS[®]) a vykazuje obrovský potenciál ve způsobu jak lze efektivně vyrábět kovové části, jako jsou komplexní prototypy, nástroje a malosériovou kovové předměty [33].

Tato metoda umožňuje získat plně homogenní strukturu kovového dílu s výbornými metalurgickými vlastnostmi. K tomuto procesu dochází v hermeticky uzavřeném prostředí nanášecí hlavy, kde je do malého místa přes optiku koncentrován výkonný laser. Za pomoci stlačeného plynu je přiváděn kovový prášek aplikací laseru roztaven a nanášen přes trysku do aplikovaného místa. Takto zhotovené díly nevyžadují další tepelné zpracování a mohou být přímo užity pro výrobu a opravu nástrojů např. pro vstřikování plastů nebo pro opravu dílů z titanu pro letecký průmysl. Nanášecí hlava většinou vykonává vertikální pohyb, a ta definuje jednotlivé vrstvy. Stůl pak realizuje pohyb v rovině x-y [2].

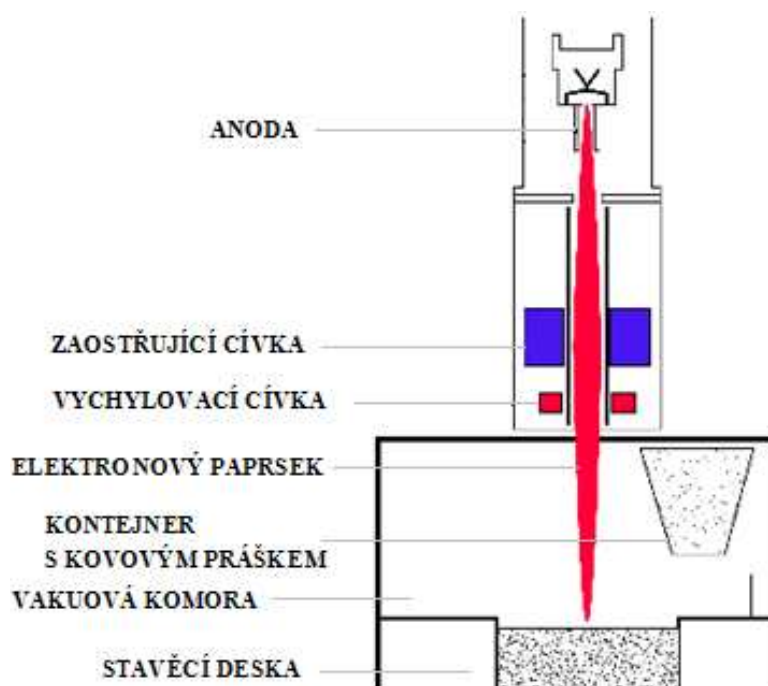


Obrázek 24: Schéma technologie Laser Engineering Net Shaping [2]

Technologie LENS® může zpracovat širokou škálu kovů, včetně titanu, slitin na bázi niklu, nerezové oceli a nástrojové oceli. Všechny tyto materiály jsou komerčně dostupné v požadované formě prášku. Výsledné komponenty z LENS trvale prokazují zlepšení metalurgických a mechanických vlastností, oproti komponentům z běžných procesů, v důsledku zlepšené mikrostruktury [33].

2.4.3 Elektron Beam Melting – EBM

EBM je technologií nabízenou švédskou firmou ARCAM AB. Technologie se podobá metodě SLS zpracovávající kovový prášek, ale na rozdíl od této metody je místo laseru užit elektronový paprsek. Díly jsou stavěny ve vakuu při teplotě 1000 °C. Vakuum má dvě výhody. Za prvé je tento proces o 95 % efektivnější ve využívání energie, což je 5 až 10 x více, než u technologie SLS. Za druhé, vakuum podporuje zpracování reaktivních kovových slitin, jako je titan. Vlivem těchto podmínek se také eliminuje vnitřní napjatost v materiálu stavěného dílu a docílí se lepších materiálových vlastností [2], [34].



Obrázek 25: Schéma technologie Elektron Beam Melting [35]

Chlazení dílu je řízeno tak, aby se dosáhlo velmi dobrého zpevnění na povrchu dílu. Zařízení EBM S12 umožňuje zpracovat slitiny titanu a slitinu kobalt-chrom [2].

2.4.4 Zhodnocení využití RP pro zhotovení trvalých forem

Popsané RP metody v této kapitole umožňují rychle vyrobit tvarově velmi složité kovové formy, které by běžným způsobem bylo velmi časově náročné a hlavně drahé. Výsledné formy mají dokonce mnohdy lepší metalurgické a mechanické vlastnosti, oproti těm vyrobeným běžnými procesy. Vyrobit formy pomocí těchto metod je z hlediska nákladů efektivnější a mohou být použity i pro velkosériovou výrobu.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce pojednává o aplikaci technologie Rapid Prototyping (RP) ve slévárenství. V úvodní části práce je vysvětleno, co to vlastně je Rapid Prototyping a proces výroby modelu pomocí něj. Dále pak je uveden přehled průmyslově nejpoužívanějších RP metod, jejich principy a jejich hlavní výhody a nevýhody. Další část obsahuje samotnou aplikaci těchto metod ve slévárenství. Ta je rozčleněna podle slévárenských technologií, kde lze využít metod RP, do jednotlivých kapitol. Na konci každé této kapitoly je pak zhodnocen přínos RP pro tu danou slévárenskou technologii.

Pomocí metod RP lze vyrobit přímo i nepřímo model i formu. Vždy je ale potřeba vybrat vhodnou RP metodu, která nejlépe splňuje konkrétní požadavky. Například k zhotovení modelu, který se dá použít k zaformování do písku, se dají využít metody FDM, SLA, LOM. Tyto jmenované metody lze také využít k zhotovení silikonové formy, které slouží k výrobě (voskového) vytavitelného modelu. Pro přímé zhotovení vytavitelného modelu se využívají metody MJM (voskový model), FDM (voskový nebo ABS model), SLA (QuickCast – model z epoxidové pryskyřice). K vytvoření vypařitelného (polystyrenového) modelu se využívá metoda SLS. Chceme-li zhotovit přímo pískovou formu, můžeme použít metodu 3DP nebo také SLS. Pro vytvoření trvalých (kovových) forem lze využít například metody DMLS, LENS, EBM blíže popsané v poslední kapitole.

Aplikace RP ve slévárenství má své nesporné výhody a to zejména při vývoji nového odlitku, kdy výrazně pomáhá zrychlit přechod mezi jeho prototypovou a hromadnou výrobou. Dále se dá říci, že výhody použití RP metod jsou výraznější při požadavku několika kusů (malých sérií) a při požadavku tvarově složitých odlitků. Naopak nevýhodou RP metod je mnohdy kvalita povrchu (je potřeba jeho úprava), u některých metod i přesnost a rozměrová stálost modelu.

Technologie RP se neustále vyvíjejí. Vylepšuje se jejich přesnost, rychlost, materiály. Odstraňují se některé nedostatky jednotlivých metod, aby se dosáhlo co největšího možného využití jejich potenciálu. To vše nám naznačuje, že RP má velkou budoucnost a to nejen ve slévárenství.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] NAVRÁTIL, R. *Rapid Prototyping* [online]. vyd. leden 2000 [cit. 2010-11-26]. Dostupné z WWW: <<http://robo.hyperlink.cz/rapid/index.html>>.

[2] DRÁPELA, M. *Modul Rapid Prototyping* [online]. vyd. 2007 [cit. 2010-11-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.vu.vutbr.cz/digidesign/Moduly/Rapid%20Prototyping%20-%20Ing.%20Milosvav%20Dr%C3%A1pela.pdf>>.

[3] BS-WIKI.DE. *Rapid Prototyping* [online]. vyd. 2009 [cit. 2010-05-26]. Dostupné z WWW: <http://www.bs-wiki.de/mediawiki/images/Rapid_Prototyping.jpg>.

[4] DÍTĚ, P. *Prototypová malosériová výroba s využitím Rapid Toolingu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daniel Koutný.

[5] PÍŠA, Z. *Rychlá výroba prototypů* [online]. [cit. 2010-11-28]. Dostupné z WWW: <<http://esf.fme.vutbr.cz/aktivita/akt-05/mod-07/rpt.pdf>>.

[6] CUSTOMPART. *Fused Deposition Modeling (FDM)* [online]. vyd. 2009 [cit. 2010-12-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/fuseddeposition-modeling>>.

[7] TURKCADCAM. *Thermojet-mjm-technology* [online]. [cit. 2011-05-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.turkcam.net/rapor/autofab/images/thermojet-mjm-technology.jpg>>.

[8] CHUA, C.K; LEONG, K.; LIM, C.S. *Rapid Prototyping Principles and Applications* [online]. Singapore : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. vyd. 2003 [cit. 2011-05-13]. 3D Systems' Multi-Jet Modeling System (MJM), s 139-143. ISBN 981-238-120-1. Dostupné z WWW: <<http://www.scribd.com/doc/54083979/14/D-SYSTEMS%E2%80%99-MULTI-JET-MODELING-SYSTEM-MJM>>.

[9] 3D TECH. *Kovové výrobky, Stereolitografie ve slévárenství* [online]. [cit. 2011-03-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.3dtech.cz/default.asp?language=cs&ion=12>>.

[10] HERMAN, A. *Lití na vytavitelný model* [online]. [cit. 2011-03-18]. Dostupné z WWW: <<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>>

[11] ELBEL, T. *Základy slévárenské technologie od historie po současnost* [online]. [cit. 2011-03-18] Dostupné z WWW: <http://fm10.vsb.cz/632/zaklady_slevarenske_technologie.pdf>

- [12] HORÁČEK, M. *Technologie vytavitelného modelu* [online]. [cit. 2011-03-18] Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>>.
- [13] 3DSYSTEMS. *Accura® 50 Plastic* [online]. [cit. 2011-04-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.3dsystems.com/products/materials/sla/accura50.asp>>
- [14] 3DSYSTEMS. *Accura® CeraMAX™ Composite* [online]. [cit. 2011-04-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.3dsystems.com/products/materials/sla/accuraCeramax.asp>>
- [15] FORECAST-3D. *FDM materials* [online]. [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <http://forecast-3d.com/fdm_materials.html>
- [16] WIMPENNY, D.I. *Použití technologie Rapid Prototyping v oblasti přesného lití*. vyd. Brno: Svaz sléváren České republiky. Slévárenství. 2005. roč. 48, č. 1, s. 29-34. ISSN 0037-6825.
- [17] BUK, V; HEINIGE, K. *Solidscape T76 Benchtop – 3D tiskárna pro puntičkáře* [online]. [cit. 2011-04-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.cad.cz/hardware/78-hardware/1532-solidscape-t76-benchtop-3d-tiskarna-pro-puntickare.html>>.
- [18] SARE. *Inkorporation of new technologies in the european precision foundry industry* [online]. [cit. 2011-05-20]. Dostupný z WWW: <http://observatorio.aimme.es/otea_document.asp?id=1447&n=1>.
- [19] PROMET FOUNDRY. *Lost Foam – výroba odlitku metodou spalitelného modelu* [online]. [cit. 2011-04-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.streamtech.tv/video-108-lost-foam-vyroba-odlitku-metodou-spalitelného-modelu.htm>>.
- [20] BARTOŠ, F. *Zhodnocení moderních slévárenských technologií nacházejících praktická uplatnění při výrobě odlitků bez nutnosti dalšího obrábění, tzv. "Net-Shape" technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 30 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [21] EOS GmbH [online]. [cit. 2011-04-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.eos.info/en/home.html>>.
- [22] EOS GmbH. *EOSINT P 390* [online]. [cit. 2011-04-25]. Dostupný z WWW: <http://www.bibus.ro/cataloge/prototipare/eosint_p390_en.pdf>.
- [23] EOS GmbH. *EOSINT P 700* [online]. [cit. 2011-04-25]. Dostupný z WWW: <http://www.rmsiberia.com/Product/eosint_p700_en.pdf>.

[24] STORO PACK GROUP. *Lost Foam* [online]. [cit. 2011-05-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.storopack.com/en/products-solutions/technical-molded-parts-made-of-eps-epp-and-neopor/lost-foam.html>>.

[25] 3DSYSTEMS. *CastForm™ PS material* [online]. [cit. 2011-05-23]. Dostupný z WWW: <http://www.3dsystems.com/products/datafiles/lasersintering/datasheets/CastForm-PS-material-A4_UK.pdf>.

[26] STROJNÍ LYCEUM. *Odlévání* [online]. [cit. 2011-05-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.strojnilyceum.wz.cz/maturita/tep/odlevani.pdf>>.

[27] Muller, B. *Rychlá výroba odlitků otevírá nové možnosti použití*. vyd. Brno: Svaz sléváren České republiky. Slévárenství. 2008. č. 1-2, s. 34-37. ISSN 0037-6825.

[28] TURKCADCAM. *Eosint S 700* [online]. [cit. 2011-05-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.turkcadcam.net/rapor/otoinsa/images/eosint-s-700-core-2.gif>>.

[29] EXONE. *ProMetal RCT S15* [online]. [cit. 2011-05-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.exone.com/images/S15.jpg>>.

[30] Z CORPORATION. *Metal Casting* [online]. [cit. 2011-05-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.zcorp.com/en/Solutions/Castings--Patterns-Molds/spage.aspx>>.

[31] TURKCADCAM. *Z Corporation – Zcast* [online]. [cit. 2011-05-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.turkcadcam.net/rapor/otoinsa/images/zcorp-zcast.jpg>>.

[32] DMLS. *Direct Metal Laser Sintering* [online]. [cit. 2011-05-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.dmls.cz>>.

[33] SANDIA. *Laser Engineered Net Shaping™* [online]. [cit. 2011-05-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.sandia.gov/mst/technologies/net-shaping.html>>.

[34] OPTOMECH. *LENS Technology* [online]. [cit. 2011-05-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.optomech.com/Additive-Manufacturing-Technology/Laser-Additive-Manufacturing>>.

[35] HIEMENZ, J. *Rapid prototypes move to metal components* [online]. vyd. 2007 [cit. 2011-05-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.eetimes.com/design/industrial-control/4013703/Rapid-prototypes-move-to-metal-components>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ABS - Akrylonitril-Butadien-Styren - používaný materiál

CAD - Computer Aided Design - počítačem podporované konstruování

DMLS - Direct Metal Laser Sintering - spékání kovového prášku laserem

EBM - Electron Beam Melting - tavení elektronovým paprskem

FDM - Fused Deposition Modeling- metoda rychlého protypování

LENS - Laser Engineering Net Shaping - metoda rychlého protypování

LOM – Laminated Object Manufacturing - metoda rychlého protypování

MJM – Multi Jet Modeling - metoda rychlého protypování

RP – Rapid Prototyping - rychlé prototypování

RT – Rapid Tooling - rychlá tvorba nástrojů

SLA - Stereolithography - metoda rychlého protypování

SLS - Selective Laser Sintering - metoda rychlého protypování

STL - Standard Triangulation Language - přenosový formát

UV - Ultra Violet - ultra fialové světlo

2D – 2 Dimensional - dvojrozměrný

3D – 3 Dimensional – trojrozměrný

3DP – 3-Dimensional Printing – trojrozměrný tisk

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Modely vyrobené pomocí RP [3]	3
Obrázek 2: Proces výroby modelu [2]	3
Obrázek 3: Schéma technologie Stereolitografie [2]	3
Obrázek 4: Schéma technologie Selective Laser Sintering [2]	3
Obrázek 5: Schéma technologie Laminated Object Manufacturing [2]	3
Obrázek 6: Schéma technologie Fused Deposition Modeling [6]	3
Obrázek 7: Schéma technologie 3-Dimension Printing [2]	3
Obrázek 8: Schéma technologie Multi Jet Modeling [7]	3
Obrázek 9: Schéma lití na vytavitelný model [12]	3
Obrázek 10: Schéma vytvoření silikonové formy [2]	3
Obrázek 11: Výstužný materiál na výrobcích vyráběných na MJM strojích [16]..	3
Obrázek 12: Tiskárna Solidscape T76 Benchtop [17]	3
Obrázek 13: Šperk vyrobený na tiskárně Solidscape [17]	3
Obrázek 14: Princip metody vypařitelného modelu [20]	3
Obrázek 15: Kryt čerpadla vytvořený z materiálu PrimeCast® 101 [24]	3
Obrázek 16: Model vytvořený z materiálu CastForm™ PS [18]	3
Obrázek 17: Schéma vytváření pískové formy [2]	3
Obrázek 18: Použití LOM k odlévání do pískové formy v závislosti na množství odlitků [27]	3
Obrázek 19: Přístroj EOSIT S 750 [21]	3
Obrázek 20: Forma vyrobená na zařízení EOSIT S 750 [28]	3
Obrázek 21: Zařízení ProMetal RCT, forma a výsledný odlitek [29]	3
Obrázek 22: Forma z písku ZCast 501 a výsledný odlitek [31]	3
Obrázek 23: Schéma technologie Direct Metal Laser Sintering [32]	3
Obrázek 24: Schéma technologie Laser Engineering Net Shaping [2]	3
Obrázek 25: Schéma technologie Elektron Beam Melting [35]	3

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Rozdíly metod RP [2]	11
Tabulka 2: Přehled nejpoužívanějších materiálů FDM metody [15].....	23
Tabulka 3: Typické mechanické vlastnosti FDM materiálů [18].....	26
Tabulka 4: Typické mechanické vlastnosti SLS materiálů [18].....	29

